

PAT-NO: JP02000124763A  
DOCUMENT-IDENTIFIER: JP 2000124763 A  
TITLE: ANALYZING METHOD FOR SAW GRATING WAVEGUIDE  
PUBN-DATE: April 28, 2000

INVENTOR-INFORMATION:

|                  |         |
|------------------|---------|
| NAME             | COUNTRY |
| HIROTA, KAZUHIRO | N/A     |

ASSIGNEE-INFORMATION:

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| NAME                     | COUNTRY |
| TOYO COMMUN EQUIP CO LTD | N/A     |

APPL-NO: JP10306306

APPL-DATE: October 13, 1998

INT-CL (IPC): H03H009/145, H03H009/25 , H03H009/64

ABSTRACT:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an analyzing method which can significantly reduce the difference between the simulation result and an actual product in consideration of the transmitting direction dependence owing to the anisotropy of a piezoelectric substrate and the velocity dispersion caused by the reflection and taken into the number of waves of a grating area by calculating the said number of waves when an anisotropic constant of the piezoelectric substrate is specified and obtaining a waveguide solution based on the calculated number of waves.

SOLUTION: The SAW(surface acoustic wave) grating waveguide analysis is carried out to an IDT electrode 3 consisting of a bus bar 2 and a grating 1

that has a dummy electrode and undergone the apodization weighting.  
As the  
electrode 3 has the dummy electrode, it can be regarded that the  
distribution  
of reflection value is even in the grating 1. Then the approximation  
of stop  
band characteristic of each transverse mode response is tried to a  
characteristic equation which obtains a waveguide solution (an  
equation which  
satisfies the condition for continuity of the displacement and stress  
at a  
boundary) in consideration of the influence of reflection caused by  
the grating  
1, i.e., the velocity dispersion.

COPYRIGHT: (C)2000,JPO

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2000-124763

(P2000-124763A)

(43)公開日 平成12年4月28日(2000.4.28)

| (51)Int.Cl. <sup>7</sup> | 識別記号 | FI         | テーマコード(参考) |
|--------------------------|------|------------|------------|
| H03H 9/145               |      | H03H 9/145 | D 5J097    |
| 9/25                     |      | 9/25       | Z          |
| 9/64                     |      | 9/64       | Z          |

審査請求 未請求 請求項の数2 FD (全9頁)

(21)出願番号 特願平10-306306

(22)出願日 平成10年10月13日(1998.10.13)

特許法第30条第1項適用申請有り 1998年9月18日 社団法人電子情報通信学会発行の「電子情報通信学会技術研究報告信学技報 vol. 98 No. 271」に発表

(71)出願人 000003104

東洋通信機株式会社

神奈川県高座郡寒川町小谷2丁目1番1号

(72)発明者 廣田 和博

神奈川県高座郡寒川町小谷二丁目1番1号

東洋通信機株式会社内

Fターム(参考) 5J097 AA28 AA31 BB01 BB11 CC09

DD01 FF01 GG01 GG02 KK01

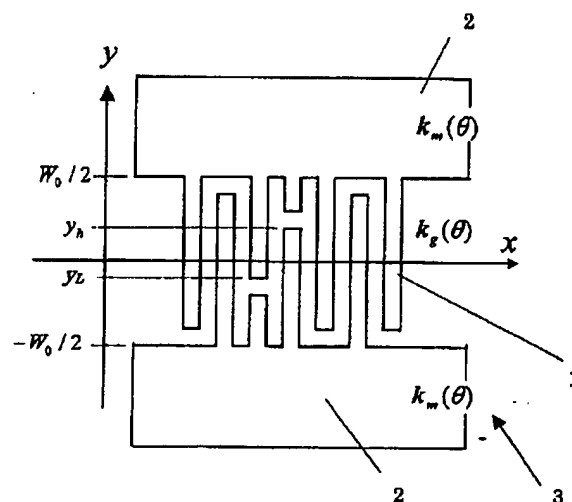
KK03 KK05

(54)【発明の名称】 SAWグレーティング導波路解析法

(57)【要約】

【課題】 SAWグレーティング導波路のより精度を向上させた解析法を得る。

【解決手段】 SAWグレーティング導波路の解析法において、圧電基板の異方性による伝搬方位依存性とグレーティングの反射による速度分散を表面波の波数に取り入れて解析する。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 圧電基板上に表面波の主たる伝搬方向に沿ってグレーティングを配置したSAWグレーティング導波路の解析法において、前記圧電基板の異方性定数を $\gamma$ としたとき前記グレーティング領域の波数 $k_x$ を

【数4】  
(ただし、 $\theta$ は伝搬角、 $k_0$ はグレーティングの波数、 $\kappa_{11}$ 、 $\kappa_{12}$ はモード結合係数、 $\omega$ は角周波数、 $V_f$ は伝搬角 $\theta$ が0のときの自由表面の速度、 $k_x'$ は表面波が異方性定数 $\gamma$ の基板上で斜め伝搬した際の自由表面におけるx方向の波数)にもとづいて求め、この波数 $k_x$ を用いて導波路解を求めることを特徴とするSAWグレーティング導波路解析法。

【請求項2】 請求項1に記載したSAWグレーティング導波路解析法に基づくプログラムを収容した記憶媒体。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明はSAWグレーティング導波路解析法に関し、特にグレーティングからの反射による速度分散を考慮したSAWグレーティング導波路解析法に関する。

## 【0002】

【従来の技術】近年、SAWデバイスは通信分野で広く利用され、高性能、小型、量産性等の優れた特徴を有することから特に携帯電話等に多く用いられている。このようなSAWデバイスの設計を行う際に考慮すべきものに、SAWデバイス内に形成されたSAW導波路がある。これは表面波を伝送路の近傍に閉じ込めて導くことであって、図14(a)に示すように、基板の上に表面波の位相速度が低速の薄膜を付着し、その両側に表面波の位相速度が高速の薄膜を付着して構成した薄膜導波路もその1つである。弾性表面波は位相速度の異なる膜の境界面でジグザグに全反射を繰り返しながら導波路を伝搬する。ここで、全反射する際の反射角 $\theta$ は、導波路の境界面、即ちx軸方向と表面波の進行方向とのなす角であり、以下、伝搬角 $\theta$ と称す。また、この限定された角度 $\theta$ で伝搬する波を導波モードと呼んでいる。この角度 $\theta$ 以外で反射する波は導波路外へ表面波のエネルギーを放射しながら急速に減衰する。

【0003】導波モードは伝搬方向に対して横方向の変位分布を有することから横モードとも呼ばれ、図14(b)～(d)に薄膜導波路を伝搬する導波モードの分布例を示す。導波モードのうち、伝搬角 $\theta$ が最も小さいモードを基本モードと呼び、以降 $\theta$ の小さい順に1次モード、2次モード、・・・と呼んでいる。なお、実際のSAW共振器、あるいはSAW共振器型フィルタ等のSAWデバイスでは位相速度の高速部分をバスバー(ベタ電極)、低速部分をグレーティングを用いて構成する方法が一般的である。

【0004】上記のようなSAW導波路の解析法として最も広く用いられている手法の1つは、R.Schmidtらによる「Thin Film Acoustic Surface Waveguides on Anisotropic Media」(IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, vol. su-22, 3 1975)であり、波数の伝搬角依存性をパラボリック近似することにより圧電基板の異方性を考慮したスカラーポテンシャル解析である。一方、山田、清水による「表面波共振子の弾性結合による二重モードフィルタ」(信学技報、US77-33、昭和52年8月)には、2つの横モードを利用した解析法が示されている。

## 【0005】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上記のSchmidtらの解析法は、導波路の主伝搬方向と結晶軸が一致している場合についての解析法であり、導波路内に関しては異方性が考慮されているものの導波路外の波数については異方性が表現されていないことや、グレーティングの反射による速度分散が考慮されていないため、伝搬角 $\theta$ が現実の値からずれる、即ち横方向変位分布(y方向変位分布)が実際の分布からずれるという問題点があった。このことは当然のことながらシミュレーションから求めた共振特性と実際に製造したSAWデバイスの周波数特性が一致しないという不具合をもたらす。一方、上記の山田らの解析法ではストリップ電極列上を伝搬する進行波成分の波数として、反射を無視した電氣的及び弾性的振動は考慮されているものの、周波数に関する事項が考慮されておらず、反射による速度分散、即ち波数の周波数依存性が考慮されていないため、シミュレーションから求めた周波数特性と実際に製造したSAWデバイスの共振特性が一致しないという問題があった。本発明は上記問題を解決するためになされたものであって、圧電基板の異方性による伝搬方位依存性及びグレーティング領域の波数に反射による速度分散を考慮してシミュレーションの結果と実際に製造したものとの差異を大幅に減少した解析法を提供することを目的とする。

## 【0006】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するために本発明に係るSAWグレーティング導波路解析法の請求項1記載の発明は、圧電基板上に表面波の主たる伝搬方向に沿ってグレーティングを配置したSAWグレーティング導波路の解析法において、前記圧電基板の異方性定数を $\gamma$ としたとき前記グレーティング領域の波数 $k_x$ を

【数4】

(ただし、 $\theta$ は伝搬角、 $k_0$ はグレーティングの波数、 $\kappa_{11}$ 、 $\kappa_{12}$ はモード結合係数、 $\omega$ は角周波数、 $V_f$ は伝搬角 $\theta$ が0のときの自由表面の速度、 $k_x'$ は表面波が異方性定数 $\gamma$ の基板上で斜め伝搬した際の自由表面におけるx方向の波数)にもとづいて求め、この波数 $k_x$ を用

いて導波解を求めることを特徴とするSAWグレーティング導波路解析法である。請求項2記載の発明は、請求項1に記載したSAWグレーティング導波路解析法に基づくプログラムを収容した記憶媒体である。

【0007】

【発明の実施の形態】以下本発明を図面に示した実施の形態に基づいて詳細に説明する。図1は、圧電基板（図示しない）の主面上に、ダミー電極を有するアポダイズ重み付けがされたグレーティング1とバスバー（ベタ電極）2とからなるIDT電極3を示す平面図であって、以下、このIDT電極3について本発明に係るSAWグレーティング導波路解析を行う。IDT電極3はダミー電極を備えているので、グレーティング1における反射量の分布は一樣であるとみなすことが出来る。また、グレーティング1が形成する導波路の両側は十分広い、一樣なベタ電極領域からなるバスバー2が配置されている。

【0008】図1に示す解析モデルにおいて、IDT電極3のSAW伝搬方向を座標軸xとし、それと直交する方向を座標軸yに設定する。バスバー2のそれぞれ内側の端のy座標を $-W_0/2$ 、 $W_0/2$ とし、グレーティング1の交差部のy軸座標を $y_L$ 、 $y_H$ とする。そして、IDT電極3のグレーティング1およびバスバー2の波数をそれぞれベクトル $k_g(\theta)$ 、ベクトル $k_b(\theta)$ とする。

【0009】上述した導波路構造を上述のように2領域と単純化したのに加えて、理解を容易にするために、圧電基板についても導波路の主伝搬方向と結晶軸が一致し、波数の伝搬角依存性をパラボリック近似が適用可能である場合とする。

【0010】一般に、導波路幅が有限の場合、IDT電極による励振やその周期的振動の影響を含めた振動現象は非常に複雑であり、専ら有限要素法（FEM）などにより厳密な解析は行われていたが、解析に要する時間やコストが高価なために、実際に設計するときには近似解析を行うのが一般的である。しかしこれまでの近似解析法は一長一短あり、シミュレーションと実際の不一致が生じていたこと前述した通りである。ここでは、導波路の導波解を与える特性方程式（境界における変位と応力との連続性の条件を満たす方程式）に、モード結合理論の解の形式を導入することにより、グレーティング1からの反射による影響、即ち速度分散を考慮して各横モード応答のストップバンド特性の近似を試みた。また、解析に用いる伝搬角 $\theta$ が零のときの諸定数、例えば自由表面速度、バスバー領域（ベタ電極）の速度、モード結合係数等は、圧電基板の材質や製造のプロセスに依存するので、実験的に求め、本解析法の妥当性が検証しやすくなるようし、横モード応答周波数とそのレベルを予測できるようにした。

【0011】表面波の波数の伝搬角依存性をパラボリック

ク近似が可能（y方向に対称な場合）であるという前提から、波数 $k(\theta) = (k_x, k_y)$ は圧電基板の異方性定数 $\gamma$ を用いて

【0012】

【数1】

$$k_x^2 + \gamma k_y^2 = k_{x0}^2 \dots \dots \dots (1)$$

【0013】と表される。ここで $k_{x0}$ は表面波の伝搬角 $\theta$ が零の場合、即ちx方向の波数である。等方性材料では異方性定数 $\gamma = 1$ であり、伝搬角 $\theta$ の小さいx軸方向付近で逆速度曲線が凸である場合には $\gamma > 0$ 、凹である場合には $\gamma < 0$ である。ここで、逆速度とは表面波の位相速度の逆数即ち、Slownessを云う。図15は位相速度の逆数の分布を示す図であって、同図(a)に示す逆速度曲線を凸形、同図(b)に示す逆速度曲線を凹形という。

【0014】

【数2】

$$k_y = k_x \tan \theta \dots \dots \dots (2)$$

【0015】ここで波数 $k_x$ 、 $k_y$ 、 $k_{x0}$ は複素数である。これらの虚数部は伝搬減衰、反射による減衰、ベタ電極領域（バスバー2）における閉じ込め減衰を表している。このように伝搬減衰や反射による減衰を導入すると必然的に伝搬角 $\theta$ を複素数として扱わなければならないが、これは光導波路で複素誘電率を有する媒質における導波を考える場合と同様である。前出のSchmidtらは、ベタ電極領域2の減衰定数を $j k_y = \sqrt{(k_x^2 - |k(\theta=0)|^2)}$ （jは虚数単位）として、基板の異方性を無視して解析していた。本解析法では、式

(1)に従い、減衰定数を $j k_y = \sqrt{(k_x^2 - k_{x0}^2) / \gamma}$ とすることにより、異方性定数を含んだ解析を行うことを特徴とする。なお、逆速度曲線におけるこの虚数分枝をも含めた近似が適当であるかどうかは、直接、虚数分枝を計算して確認すればよい。

【0016】SAW導波路の解析では、当然のことながら導波路内外の速度（波数）を正しく評価することが重要であるが、グレーティングのような周期構造においては、それからの反射によるストップバンドの形成と速度分散が生じることが良く知られている。以下、主伝搬方向の波数 $k_x$ がモード結合理論の解の形となるように置くことで、導波路解析に際して速度分散の影響を考慮する。

【0017】ある周波数 $\omega$ における導波状態において、グレーティング1領域の伝搬角が $\theta$ であるとし、振動を考える前（自由表面）のx方向波数は、式1、2より

【0018】

【数3】

$$k_x' = \frac{k_{x0}'}{\sqrt{1 + \gamma \tan^2 \theta}} = \frac{\omega / V_f}{\sqrt{1 + \gamma \tan^2 \theta}} \dots \dots \dots (3)$$

【0019】となる。この波数 $k_x'$ は、表面波が異方性定数 $\gamma$ の基板上で斜め伝搬した際の $x$ 方向の位相変化を表しており、ここで、 $V_f$ は伝搬角 $\theta=0$ における自由表面の位相速度である。虚数部に伝搬減衰を含めて考える。グレーティング1による影響を表現するため、 $k_x'$ を振動前の波数としてモード結合方程式を立てて解くと、 $x$ 方向の波数(導波モードの波数)は次のように書くことが出来る。

【0020】

【数4】

$$k_x = k_0 \pm \sqrt{(k_x' + \kappa_{11}(\theta) - k_0)^2 - |\kappa_{12}(\theta)|^2} \\ = k_0 \pm \sqrt{\left( \frac{\omega/V_f}{\sqrt{1+\gamma \tan^2 \theta}} + \kappa_{11}(\theta) - k_0 \right)^2 - |\kappa_{12}(\theta)|^2} \quad (4)$$

【0021】ここで、 $k_0$ はグレーティング1の電極周期 $\lambda_0$ から $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ の式で求まる波数、 $\kappa_{11}(\theta)$ 、 $\kappa_{12}(\theta)$ はそれぞれ伝搬角依存性を考慮した自己結合係数と相互結合係数(これらをモード結合係数という)である。有限開口のグレーティング1について、これらモード結合係数の $\theta$ 依存性を決定するに際しては無限開口長を持つグレーティングを斜め伝搬する場合について既に解析された周知の結果を用いる。さて、式(4)によりグレーティング上を斜め伝搬した際の振動後の $x$ 方向の波数が表現されたとすれば、グレーティング域の $y$ 方向波数 $k_{gy}$ は、

【0022】

【数5】

$$k_{gy} = k_x \tan \theta \quad (5)$$

【0023】で与えられる。また、ベタ電極2の領域においても、グレーティング1の領域と共通の異方性定数 $\gamma$ により式(1)が成立するとすれば、ベタ電極2領域の減衰定数 $j k_{ny}$ は次式の関係となる。

【0024】

【数6】

$$k_x^2 + \gamma k_{ny}^2 = k_{m0}^2 = (\omega/V_m)^2 \quad (6)$$

【0025】ここで、 $V_m$ は伝搬角 $\theta=0$ におけるベタ電極2領域の位相速度である。ところで、図1のような単一導波路の導波条件(特性方程式)は、良く知られているように次式となる。

【0026】

【数7】

$$\begin{cases} k_{ny} \tan\left(k_{ny} \frac{W_0}{2}\right) = j k_{nx} & \text{対称モード} \\ k_{ny} \tan\left(k_{ny} \frac{W_0}{2}\right) = j k_{nx} & \text{反対称モード} \end{cases} \quad (7)$$

【0027】ここで、式4により、各横モード毎のストップバンド近傍の周波数特性を検討しておく。図2は、定数として $\gamma=1.5$ 、 $\kappa_{11}(\theta)=0.01k_0$ 、 $\kappa_{12}(\theta)$

$=0.01k_0$ を用い、伝搬角 $\theta$ をパラメータにして描いたブリルアン・ダイアグラム(周期構造上を伝搬する弾性表面波の分散関係、即ち角周波数と波数との関係を表す図)である。横軸はグレーティング1の電極周期 $\lambda_0$ で決まる波数 $k_0$ で規格化した波数 $k_x/k_0$ 、縦軸は、自由表面の速度 $V_f$ と波数 $k_0$ との積で、グレーティング1の中を伝搬する表面波の周波数 $\omega$ を規格化した $\omega/(k_0 V_f)$ を用いている。速度分散がない場合には規格化波数 $k_x/k_0$ と規格化周波数 $\omega/(k_0 V_f)$ の関係は直線になることはよく知られているが、速度分散がある場合には図2より明らかなように、歪んでおり、伝搬する表面波の波数 $k_x$ がグレーティング1の波数と一致する、即ち $k_x/k_0=1$ となる周波数領域が現れる。この周波数領域をストップバンドと云う。伝搬角 $\theta$ が大きくなる程、横モードの次数が高くなり、ストップバンドが高周波側へ高周波側へシフトしていることが分かる。異方性定数 $\gamma<0$ の場合には、逆に低周波側へシフトすることになる。尚、式4中の複号は、虚数部が常に負となるように、実部のみの場合にはグレーティング1が形成するストップバンドより低域側で-、高域側で+をとる。

【0028】次に、図3はグレーティング1の中を伝搬する表面波の基準化周波数 $\omega/(k_0 V_f)$ に対する位相速度 $V_g$ を自由表面の位相速度 $V_f$ で基準化した基準化速度 $V_g/V_f$ との関係を示す図である。その速度 $V_g$ は、波数 $k_x$ を用いて次式で計算することができる。

【0029】

【数8】

$$V_g = \omega/(k_x / \cos \theta) \quad (8)$$

【0030】図3から明らかなように、規格化周波数 $\omega/(k_0 V_f)$ に対し規格化速度 $V_g/V_f$ はストップバンド近傍では、該ストップバンドから離れた漸近値、即ち平均速度からプラス側及びマイナス側に大きく変化していることが分かる。そして、伝搬角 $\theta$ が大きくなる程、図2と同様にストップバンドが高周波側へシフトし、かつ $\gamma>1$ であるため平均速度が上昇していることが分かる。

【0031】図2、図3では伝搬角 $\theta$ を一定として描いたが、厳密には、速度分散による速度変化のためにストップバンド付近で各々のモードの $\theta$ は変化する。ただ、速度変化の大きさは相互結合係数 $\kappa_{12}(\theta)$ に依存しているため、そう大きくは変化しない。そのため、各モードの $V_g$ は、ほぼ図3に示すように変化すると考えてよい。このように単純化して考えると、周波数によらず一定であるベタ電極2領域の速度とグレーティング1領域の速度 $V_g$ との差が周波数により変化し、ストップバンド下端付近では速度差 $\Delta v$ が大きく、ストップバンド上端付近では $\Delta v$ が小さくなる(または、その逆)。

【0032】ある導波モードについての前述の波数 $k_x$ が進行波の波数となるモード結合方程式を解くことにより、重み付けIDT全体を表す分布定数等価回路が導出

7

できる。ただし、モード結合方程式中の結合係数 $\alpha$ は $x$ の関数であり、その位置での励振開口 ( $y_L(x)$ ,  $y_h(x)$ ) を用いて、次式で与えられる。

【0033】

【数9】

$$\alpha(x) = \alpha_0 \frac{\int_{y_L(x)}^{y_h(x)} f(y) dy}{\sqrt{W_{\max} \int_{-\infty}^{\infty} f^2(y) dy}}$$

【0034】ここで、 $\alpha_0$ は一樣波で考えた最大励振開口 $W_{\max}$ の時の変換係数、 $f(y)$ は対象とする導波モードの分布関数である。上述した方法により定まる波数 $k_x$ を用いて各横モード毎にモード結合方程式を解き、それらの解から求まる各モード毎の電気端子応答を求めて合成すれば全体の応答が得られることになる。

【0035】異方性定数 $\gamma$ は、自由表面の伝搬角 $\theta=0$ 付近の位相速度を計算することにより決定できる。多くの圧電基板では、ベタ電極膜やグレーティングが付いても、逆速度曲線の曲率は大きく変わらない。例えば、圧電基板の36.5° Y-X水晶基板では $\gamma=1.38$ 、四硼酸リチウム(45°カットX-Z  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 、以下LBOと記す)は $\gamma=1.66$ である。

【0036】本解析法では、伝搬角 $\theta=0$ における自由表面の位相速度 $V_f$ およびベタ電極領域の速度 $V_a$ を最初に与えることになる。これらの値は絶対値が重要であるので、コムフィルタを試作し、上記の値を測定から求めた。図4、5はそれぞれ36.5° Y-X水晶基板、四硼酸リチウム基板(LBO)について、膜厚 $h$ を変化させた場合の位相速度を測定した値をプロットした図である。ここで、◆印はベタ電極の位相速度、■印は自由表面の位相速度を表している。また、図4、5中には、周知の有限要素法(大淵、小柴「金属グレーティングに入射するSAW反射特性の有限要素法解析」、電子情報通信学会論文誌, Vol. J76-A, No. 2, pp. 102-107(1993))による解析結果を▲印で示してある。ただし、両基板とも $V_f$ が実測と等しくなるように、カットアングルを考慮して重ね書きした。

【0037】モード結合係数  $\kappa_{11}(\theta)$ 、 $\kappa_{12}(\theta)$  の決定には、既に述べたように無限開口グレーティング上を斜め伝搬する表面波特性の解析手法が利用できる。STカット水晶基板上にアルミニウムAl、金Auの電極膜を付着した際の、モード結合係数  $\kappa_{11}(\theta)$ 、 $\kappa_{12}(\theta)$  の伝搬角 $\theta$ 依存性については、「Equivalent networks for SAW interdigital transducers, IEEE Trans. Ultrason., Vol. 41 No. 3, pp. 402-411(1994)に開示されている。上記文献の図からの読み取りであるが、 $\theta < 30^\circ$ の範囲について、ほぼ次式で近似出来る。

【0038】

【数10】

8

$$\begin{aligned}\kappa'_{11}(\theta) &= \kappa_{11}(\theta) / k_0 \\ &= \kappa'_{11}(0) \cdot (1 + 0.151\theta + 0.759\theta^2) \\ \kappa'_{12}(\theta) &= \kappa_{12}(\theta) / k_0 \\ &= \kappa'_{12}(0) - |\kappa'_{12}(0)| \cdot (0.0385\theta + 4.73\theta^2)\end{aligned}$$

【0039】式10では、ダッシュをつけた $\kappa'$ 

$\kappa'_{11}(0)$  及び  $\kappa'_{12}(0)$  を用いているが、これは同式からも明かなように、グレーティング1の波数 $k_0$ でそれぞれ規格した規格化自己結合係数及び規格化相互結合係数である。ここで、Al電極では基準化相互結合係数 $\kappa'_{12}(0) > 0$ 、Au電極では $\kappa'_{12}(0) < 0$ であり、伝搬角 $\theta$ の単位は[rad]である。45° 四硼酸リチウム(LBO)の伝搬角 $\theta$ 依存性については、公知の解析結果が無いので、式10を代用する。サンプルの導波路幅が十分広いグレーティングについてその伝達特性の測定を水晶と四硼酸リチウムの両基板について行い、ライン占有率(電極指幅とスペース幅との和に対する電極指幅の比)依存性も含めて $\kappa'_{11}(0)$  および  $\kappa'_{12}(0)$  を決定した。以下の解析では、異方性定数 $\gamma$ とモード結合係数の伝搬角 $\theta$ 依存性は理論値を用い、それ以外の値、即ち $V_f$ 、 $V_a$ 、 $\kappa'_{11}(0)$ 、 $\kappa'_{12}(0)$  は、上述した通り測定した数値を用いている。

【0040】本解析法の妥当性を検証するために、図6に示すように圧電基板上に2つのIDT電極4、5を近接配置し、その両側にグレーティング反射器6a、6bを配設した2ポート共振子を試作し、その横モードの周波数レスポンスを測定した。図6のパスバーの幅は図1のモデルに適合するよう十分広く取ってある( $10\lambda_0$ 以上)。この電極構成を選んだ理由は、共振ピークが単純であり、各横モードのピークを分離して測定しやすいからである。36.5° Y-X水晶基板、45° 四硼酸リチウム基板(LBO)とも、IDT電極の周期は $\lambda_0 = 20 \mu\text{m}$ とし、入出力を50Ωで終端し、Sパラメータの順方向伝送特性 $S_{21}$ を測定した。試作後、サンプルの膜厚 $h$ とライン占有率を測定し、周知の近似式を使って諸定数、即ちベタ電極の位相速度 $V_a$ 、基準化モード結合係数 $\kappa'_{11}(0)$ 、 $\kappa'_{12}(0)$ を得た。図7には、試作したサンプルのパターン条件等を示してある。図8(a)、(b)から図12に示した細線の周波数特性は、これらの定数を用いたシミュレーションより求めたものである。

【0041】図8(a)は、圧電基板に36.5° Y-X水晶基板を用い、電極膜厚 $h$ を $h = 1\% \lambda_0$ 、導波路幅 $W_0 = 40\lambda_0$ とした場合の測定値(太線)およびシミュレーション特性(細線)の図である。なお、図の横軸はMHz、縦軸はレスポンスをdBで表示してある。グレーティング域の速度分散を考慮した本解析法によるシミュレーション(以下、分散導波と称す)は、対称1次モード(S1)、対称2次モード(S2)の共振ピークの周波数と応答レベルを良く再現している。次に、図8(b)は導

波解の算出の際に反射による速度分散を考慮しないシミュレーションにより求めた周波数応答（以下、従来導波と称す）を細線で示している。従来導波解析法について、簡単に説明すると、まず、自己結合係数 $\kappa_{11}(\theta)$ のみ考慮したグレーティング域の速度から導波解を求め、次にその導波解の $x$ 方向の波数に対して、反射振動の影響である相互結合係数 $\kappa_{12}(\theta)$ を与える。言い換えれば、ストップバンド中央の速度で導波解析を求めるとのことである。従来導波による特性を実測値と比較すると、対称2次モードS2の応答が再現できていないことが分かる。実際には、対称2次モードS2の解は存在しているが、 $y$ 方向分布が分散導波の時と違っているために、結合係数 $\alpha(x)$ が非常に小さくなり見えなくなっている。

【0042】図9(a)、(b)は、36.5° Y-X水晶基板に、電極膜厚 $h=1\%\lambda_0$ 、導波路幅 $w_0=15\lambda_0$ とした測定結果（太線）と、分散導波より求めたレスポンス（細線）との比較と、従来導波（細線）との比較を示す図である。分散導波は、対称1次モードS1の共振ピークを良く再現されている。従来導波は、対称1次モードS1の共振ピークの位置とレベルが若干ずれている。

【0043】図10は対称4次モードS4の応答まで求められた例で、36.5° Y-X水晶基板に電極膜厚 $h=2\%\lambda_0$ を付着した場合のレスポンス特性を示す。図10(a)の分散導波では対称1次モードS1から対称4次モードS4の応答まで再現できているのに対し、同図(b)の従来導波では対称4次モードS4が現れず、且つピーク周波数がずれている。図11は、圧電基板にLBOを用い、電極膜厚 $h=2\%\lambda_0$ 、導波路幅 $w_0=20\lambda_0$ とした結果を示す。図10(a)の分散導波では対称1次から3次まで測定レスポンスとシミュレーションカーブが極めて類似しているが、同図(b)の従来導波は対称3次モードS3が現れず、対称2次モードS2の周波数およびレベルもずれている。

【0044】図12はLBO基板上に配設したIDT電極にコサイン型のアポダイズ重み付けを施した場合の結果を示す。図11の実測値と比較すると対称2次モードS2が相対的に大きく抑圧されているのが分かる。シミュレーションでも応答レベルが良く再現されており、式(10)による励振重み付けの表現が妥当であることを示している。

【0045】図13は、図1に示した解析モデルの電気的等価回路の一例である。この等価回路は周知の回路（廣田、中村「モード結合理論に基づく重み付けIDTの分布定数等価回路」、日本音響学会講演論文集、平成5年10月、pp.1045-1046と、廣田、中村、本郷、水迫「重み付けIDTの導波モードを考慮したCOM等価回路」電子情報通信学会技術研究報告、US96-12、pp.27-32(1996)）と同様である。上記文献と異なるのは導波モードの波数 $k_x$ の決定法であり、本解析法では式4~7を

連立して解いた波数 $k_x$ を用いている。上述した方法により定まる波数 $k_x$ を用いて各モード毎に等価回路を解析し、それらを合成して電気端子応答が得られる。この等価回路を用いた解析の特徴は、式9により各導波モードと励振開口との結合の強さを評価しているの、伝搬方向に直列に配置した複数のIDT電極に重み付けが施されていても解析可能である点である。また、重み付けの効果は、図4中のインピーダンス $Z_E$ に表現される。この等価回路はモード結合理論に基づいているので、等価回路を用いて導波路を解析した結果とモード結合理論を用いて導波路を解析した結果は当然のことながら同一であり、しかも等価回路による解析は取り扱いが容易である。言い換えれば、本等価回路を用いるだけで以上に述べた導波路解析が可能であると言える。

【0046】以上のように、本解析法の対象はグレーティング1とバスバー2との2領域からなる単一導波路のSAWデバイスについてであるが、バスバー2が有限幅である例や、グレーティング1が複数に分割されているなどの場合についても適用可能であるし、複数導波路の近接構造の場合についても本解析法が適用できる。また、短絡グレーティング反射器については、IDT電極3の電気端子を短絡したものとして取り扱えばよい。更に、導波路構造がもっと複雑である場合には、式8は各領域の $y$ 方向の波数を含んだ式とすればよい。導波解の計算は、異方性定数 $\gamma$ 、自由表面の位相速度 $V_f$ 、ベタ電極部の位相速度 $V_\phi$ 、自己結合係数 $\kappa_{11}(\theta)$ 、相互結合係数 $\kappa_{12}(\theta)$ を与え、ある $\omega$ について、式5、6、7、8を満たす複素伝搬角 $\theta$ を求めることによって行えばよい。

【0047】

【発明の効果】本発明は、以上説明したように、グレーティング領域の速度がストップバンド付近で変化することにより、周辺領域との速度差が変化し導波状態が変わることを積極的に考慮した解析法であり、横モード応答の周波数やそのレベルが実測とほぼ一致するという効果を奏する。従って、本解析法を用いることによりSAWデバイスの試作の回数を減少させ、要する工数を大幅に削減できるという優れた効果をもたらす。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係るSAWグレーティング導波路解析法を説明するためのIDT電極の平面図である。

【図2】伝搬角 $\theta$ をパラメータとしたブリルアン・ダイアグラムである。

【図3】グレーティング領域の速度 $V_g$ を伝搬角 $\theta$ をパラメータとし、周波数に対してプロットした図である。

【図4】36.5° Y-X水晶基板における電極膜厚 $h$ と自由表面の位相速度 $V_f$ とベタ電極部の位相速度 $V_\phi$ の関係を示す図である。

【図5】45° X-Z  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 基板における自由表面の位相速度 $V_f$ 及び電極膜厚 $h$ とベタ電極部の位相速度 $V_\phi$ の関係



を示す図である。

【図6】横モード応答の測定用に試作した2ポート共振子の電極パターンを示す平面図である。

【図7】試作したサンプルの材料、電極パターン、電極膜厚等を示す図である。

【図8】(a)、(b)は36.5° Y-X水晶基板を用いて試作したサンプルの周波数応答と、本解析法によるシミュレーションによる周波数応答および従来の手法による周波数応答を示す図である。

【図9】(a)、(b)は36.5° Y-X水晶基板を用いて試作したサンプルの周波数応答と、本解析法によるシミュレーションによる周波数応答および従来の手法による周波数応答を示す図である。

【図10】(a)、(b)は36.5° Y-X水晶基板を用いて試作したサンプルの周波数応答と、本解析法によるシミュレーションによる周波数応答および従来の手法による周波数応答を示す図である。

【図11】(a)、(b)は45° X-Z Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>を用いて試作したサンプルの周波数応答と、本解析法によるシミュ

レーションによる周波数応答および従来の手法による周波数応答を示す図である。

【図12】45° X-Z Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>を用いて試作したサンプルの周波数応答と、本解析法によるシミュレーションによる周波数応答および従来の手法による周波数応答を示す図である。

【図13】モード結合理論から得られたIDT電極の電氣的等価回路である。

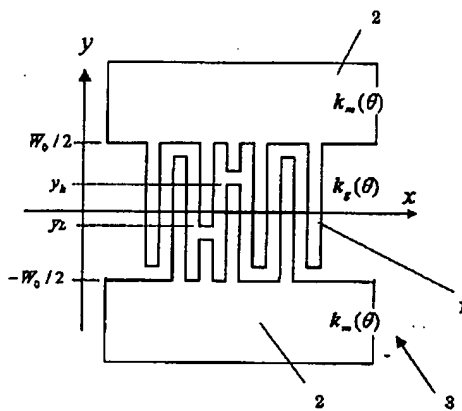
【図14】(a)は薄膜導波路の構成を示す斜視図と導波路を伝搬する表面波の波数 $k$ 、伝搬角 $\theta$ 説明する図、(b)～(d)は該導波路を伝搬する基本モード～2次モードの変位分布を示す図である。

【図15】逆位相速度を説明する図で、(a)は凸型、(b)は凹型の逆速度曲線を示す図である。

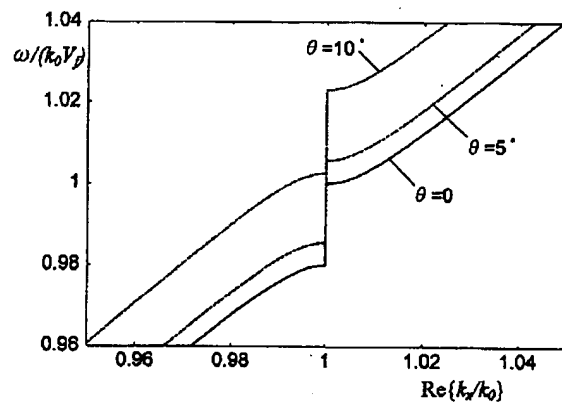
【符号の説明】

- 1・・・グレーティング
- 2・・・バスバー（ベタ電極）
- 3、4、5・・・IDT電極
- 6a、6b・・・グレーティング反射器

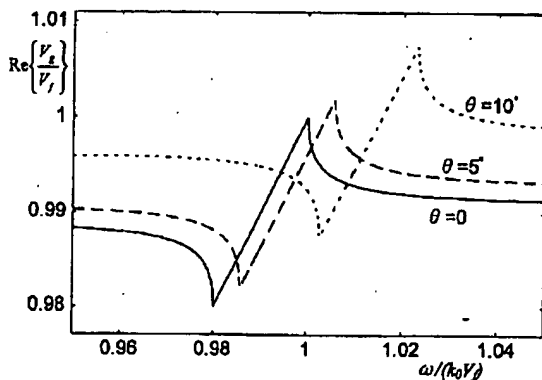
【図1】



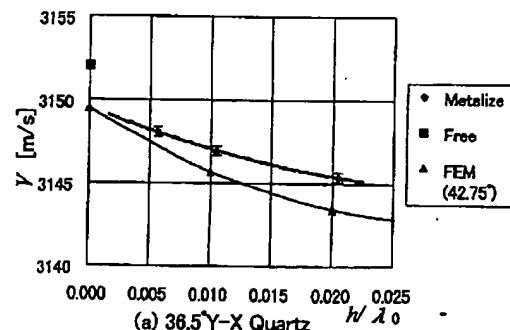
【図2】



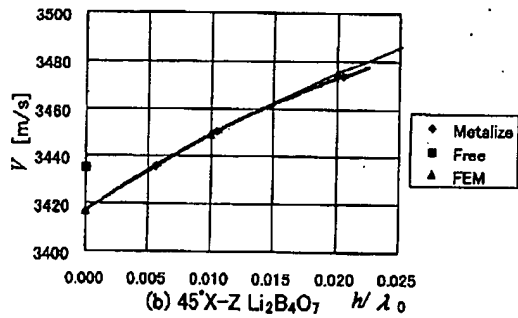
【図3】



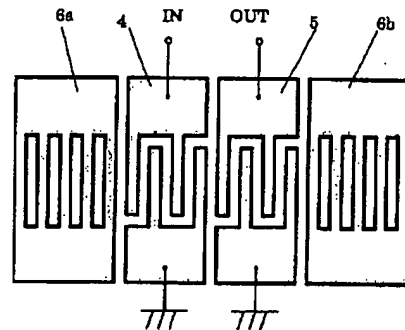
【図4】



【図5】



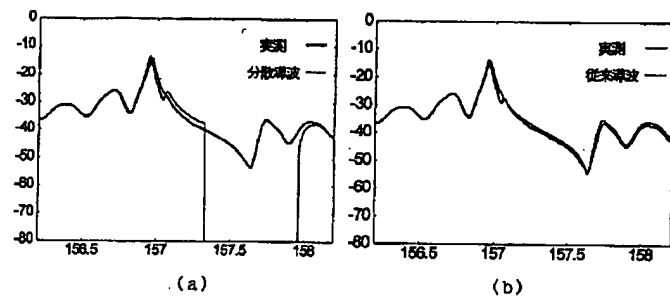
【図6】



【図7】

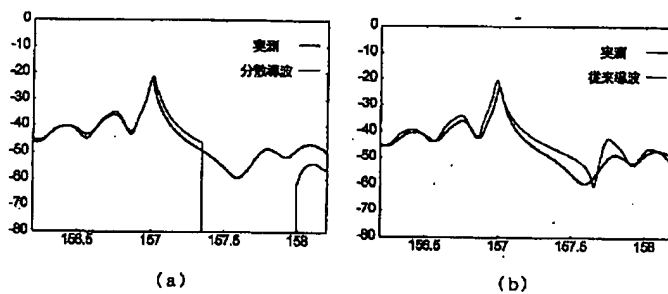
| 図番号            | 基板     | 膜厚 [% $\lambda$ ]<br>ライン占有率 | 導波路<br>幅<br>[% $\lambda$ ] | 片側IDT対数<br>片側反射係数 |
|----------------|--------|-----------------------------|----------------------------|-------------------|
| 図9<br>(a),(b)  | 水晶     | 1.047                       | 40                         | 50<br>400         |
|                |        | 0.566                       |                            |                   |
| 図10<br>(a),(b) |        | 1.047                       | 15                         |                   |
|                |        | 0.549                       |                            |                   |
| 図11<br>(a),(b) |        | 2.048                       | 40                         | 20<br>100         |
|                | 0.485  |                             |                            |                   |
| 図12<br>(a),(b) | L      | 1.047                       | 20                         |                   |
|                |        | 0.472                       |                            |                   |
| 図13            | B<br>O | 1.047<br>0.494              | 20<br>cos 値のみ              |                   |

【図8】



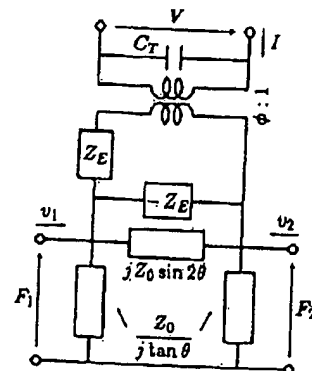
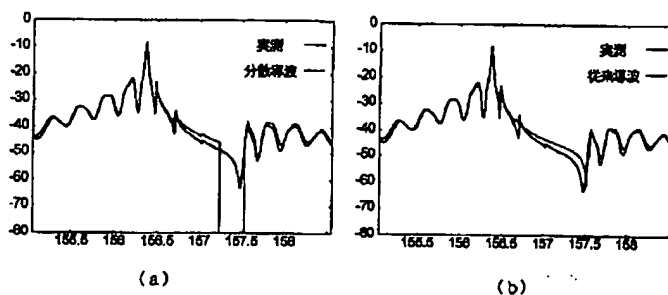
【図12】

【図9】

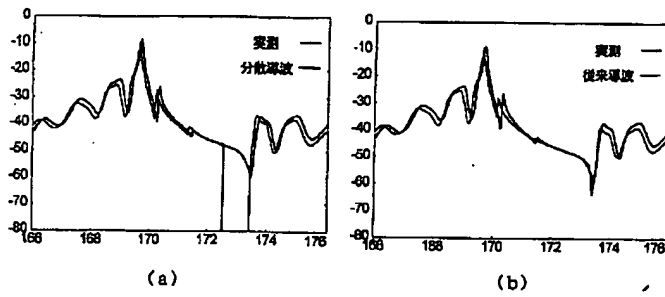


【図13】

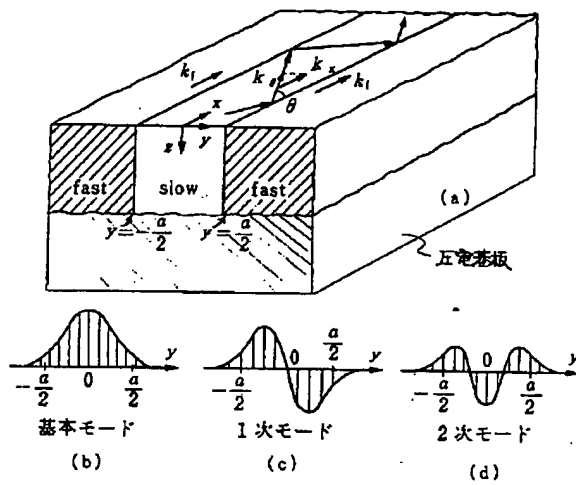
【図10】



【図11】



【図14】



【図15】

